Subject: ۱   Date:

ترمودینامیک.

ترمو ← دینامیک

حرارتی   حرکتی (پویایی)

ترمودینامیک شاخه‌ای است از علم که در خصوص انرژی و تبدیل آن به اشکال مختلف تغییرات حالت‌های ماده، تعادل یا فرآیندها با تکیه بر مفاهیم پایه‌ای چون کار، انرژی و حرارت می‌پردازد.

با توجه به آنچه گفته شد کاربردهای زیر را می‌توان به ترمودینامیک مرتبط دانست:

نمونه‌های مطرح:

- موتورهای احتراقی / نیروگاه‌ها و تجهیزات تولید توان } سیکل‌های ترمودینامیکی
- انتقال حرارت { گرمایشی / سرمایشی } تهویه مطبوع
- رفتار ماده و تغییرات فاز
- تعادل شیمیایی (واکنش شیمیایی)
- تغییرات مکانیکی در قالب تغییرات انرژی { دما / فشار

با توجه به دسته‌بندی زیر:

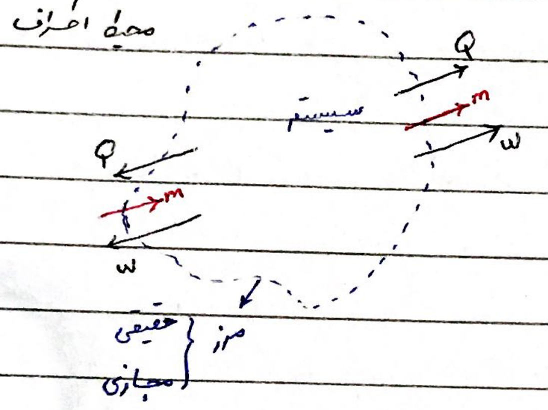
دیدگاه‌های حاکم بر ماده {
- میکروسکوپی   P.T
- ماکروسکوپی ← ترمودینامیک کلاسیک

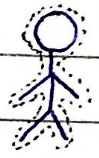
چنانچه به ماده از منظر ماکروسکوپی بنگریم (بدون بررسی تک تک ذرات) به اصطلاح ترمودینامیک کلاسیک خواهیم داشت که در مقابل ترمودینامیک آماری (که به بحث‌های رفتار ذرات می‌پردازد) قرار می‌گیرد.

تعاریف (مفاهیم پایه)

سیستم: تمام یا بخشی از یک فضای فیزیکی مورد مطالعه را اصطلاحاً سیستم می‌گوییم که توسط مرز از محیط اطراف جدا می‌شود

مرز یک سیستم می‌تواند حقیقی، مجازی یا می‌تواند بخشی حقیقی و بخشی از آن مجاز باشد همچنین مرز می‌تواند ثابت یا متحرک باشد





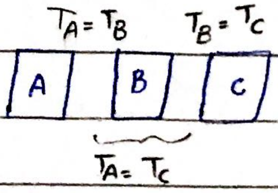
ماده:
- سیال: مایع، گاز
- جامد

انواع سیستم: عبارتند از سیستم بسته و باز

یک سیستم بسته با محیط اطراف تنها تبادل انرژی در قالب کار و حرارت دارد. یک حجم کنترل (سیستم باز) علاوه بر امکان تبادل انرژی (به صورت کار یا حرارت) امکان تبادل جرم با محیط را داراست.

انرژی: انرژی به معنای توانایی انجام کار یا قابلیت کاردهی است که به اشکال مختلف ظاهر می‌شود.

قوانین پایه ترمودینامیک:

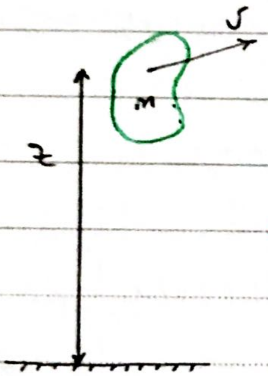


- هم‌دمایی (قانون صفرم)
- قانون اول ترمودینامیک (بقای انرژی) ← کمیت انرژی
- قانون دوم ترمودینامیک ← کیفیت انرژی

قانون اول ترمودینامیک

انواع انرژی به اشکال مختلفی دسته بندی می‌شوند که به عنوان مثال می‌توان به دسته بندی میکروسکوپی یا ماکروسکوپی اشاره کرد و یا تقسیم بندی زیر را تعریف نمود.

انرژی و انواع آن	ذخیره‌ای: جنبشی (E_k)، پتانسیل (E_p)، انرژی داخلی (U)
دسته بندی انرژی	انتقالی: کار (W)، حرارت (Q)



$E_k = \frac{1}{2} m V^2$

$E_p = mgz$

انرژی جنبشی انرژی ای است که یک سیستم به خاطر حرکت نسبت به یک دستگاه مختصات مرجع کسب می‌کند.

انرژی پتانسیل انرژی ای است که سیستم در میدان جاذبه به سبب ارتفاعش دارد.

انرژی کل مجموع انرژی های جنبشی، پتانسیل و داخلی یک سیستم را انرژی کل می‌نامند و داریم

$E = E_k + E_p + U =$ انرژی کل

$e = e_k + e_p + u$ به ازای واحد جرم

$e_k = \frac{E_k}{m}$, $e_p = \frac{E_p}{m}$, $u = \frac{U}{m}$ که

Subject : Date :

اجزای انرژی داخلی | مولکولی { نوسانی، دورانی، انتقالی } ذرات
هسته‌ای
انرژی نهان
شیمیایی

انرژی جنبشی مولکولی : وابسته به انواع جنبش‌های مولکول مربوط به جنبش‌های مولکول یک ماده داخل سیستم است .

انرژی هسته‌ای : مربوط به چیدمان اتم‌ها در یک ماده بوده .

انرژی نهان : مقدار انرژی لازم یا موجود در ماده برای تغییر فاز است .

انرژی شیمیایی : به ساختارهای بین مولکولی ذرات ماده مربوط می‌باشد .

خواص متمرکز (شدتی) و مقداری (گسترده)

خواص از یک سیستم که مستقل از مقدار جرم سیستم می‌باشد (مستقل از اندازه) مانند دما ، فشار ، چگالی خواص شدتی یا متمرکز

خوانده می‌شوند اما خواص مقداری یا گسترده به اندازه سیستم (مقدار جرم) وابسته‌اند مانند خود جرم و حجم بجز دما و فشار

P T

خواص مقداری را با حروف بزرگ و خواص شدتی را با حروف کوچک نشان می‌دهیم

خواص ویژه یا مخصوص

از تقسیم خواص مقداری به جرم خاصیت مخصوص یا ویژه بدست می‌آید با این خواص در ترمودینامیک بیشتر سروکار داریم

MICRO

معمولا مثال: $\frac{1}{\rho}$ = حجم مخصوص ← $v = \frac{V}{m}$ ، $u = \frac{U}{m}$ ، $e = \frac{E}{m}$

تعادل: در ترمودینامیک با حالت های تعادل سروکار داریم که در چنین شرایطی هیچ پتانسیل موازنه نشده‌ای در سیستم وجود ندارد همه چی یکنواخت می باشد

انواع تعادل عبارتند از: تعادل مکانیکی، حرارتی (گرمایی) ← تعادل ترمودینامیکی، شیمیایی

تعادل مکانیکی: وقتی بین نقاط مختلف یک سیستم اختلاف فشار نداشته باشیم، سیستم دارای تعادل مکانیکی می‌باشد (فشار یکی است)

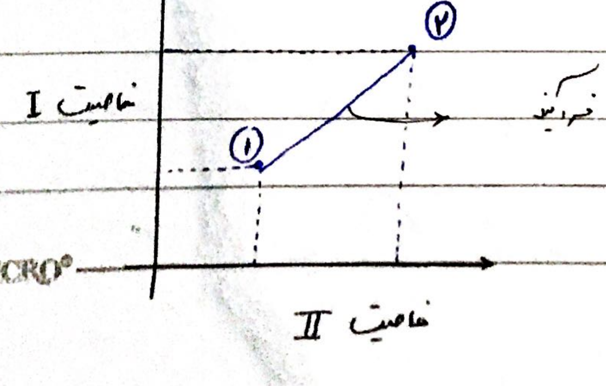
در تعادل فازی، حجم هر فاز دارای یک مقدار مشخص است و در آن سطح باقی می‌ماند.

تعادل شیمیایی: اگر در طول زمان ترکیب شیمیایی سیستم تغییر نکند به عبارتی واکنش شیمیایی در سیستم رخ ندهد سیستم دارای تعادل شیمیایی است.

تعادل گرمایی: اگر دما در کل سیستم یکسان و یکنواخت باشد سیستم دارای تعادل دمایی است.

نکته: وقتی سیستم در حال تعادل ترمودینامیکی است که تمامی شرایط تعادل فوق را داشته باشد.

فرآیند: هرگاه یک سیستم از حالت تعادل به حالت تعادل دیگری برسد اصطلاحاً یک فرآیند را طی کرده است.



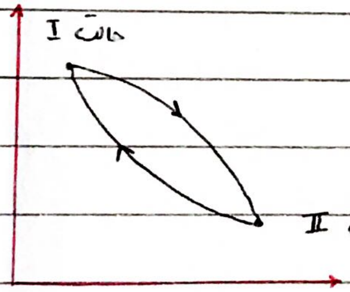
حالت ترمودینامیکی: ماهیت ماده یا سیستم در هر حالت تعادل را یک حالت ترمودینامیکی یا State می‌نامیم

* **فرآیند شبه تعادلی:** وقتی یک فرآیند طوری گسترش یابد که همواره سیستم به حالت بی نهایت کوچک نزدیک به حالت تعادل باقی بماند آن را شبه تعادلی می‌نامیم.

دلایل اهمیت فرآیند شبه تعادلی: با استفاده از مفهوم شبه تعادلی امکان تعریف کمیت‌های ترمودینامیکی در طی فرآیند فراهم شده و بیشترین مقدار خروجی مطلوب (مثلاً کار تولیدی توسط موتور و یا کمترین کار مصرفی توسط پمپ یا کمپرسور) در چنین شرایطی محقق می‌شود.

فرآیندهای کمیت ثابت: اگر در فرآیندی یکی از خواص ثابت بماند با استفاده از پیشوند ISO قبل از خاصیت مذکور این مفهوم را بیان می‌کنند مثلاً فرآیند دما ثابت را ایزوترم (ISO Term) و فرآیند فشار ثابت را ایزوبار (ISO bar) می‌نامیم.

سیکل یا چرخه: مجموعه‌ای از فرآیندها که حالت ابتدایی و انتهایی آن‌ها یکسان است اصطلاحاً سیکل یا چرخه می‌نامند.



چرخه (سیکل‌ها):
- ترمودینامیکی ← یخچال
- مکانیکی ← موتورهای مختلف

نکته: در سیکل‌های ترمودینامیکی سیال کاری به حالت اولیه باز می‌گردد اما در سیکل مکانیکی الزاماً اینگونه نیست.

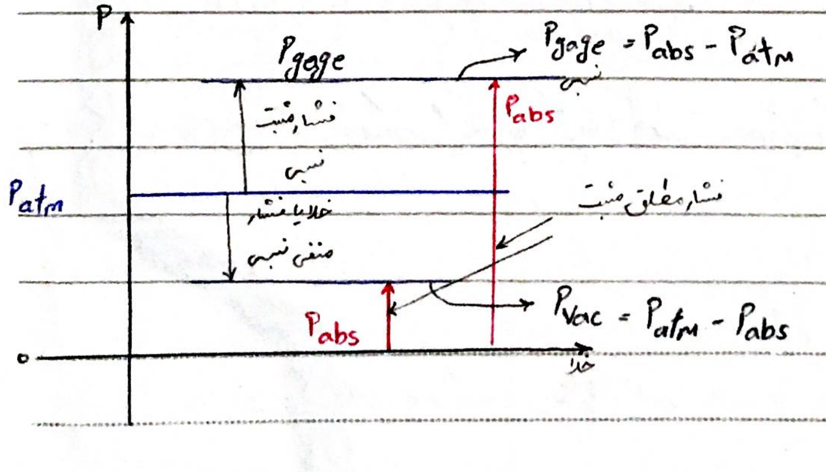
اصل حالت: حالت یک سیستم ساده تراکم پذیر بوسیله‌ی دو خاصیت مستقل کاملاً مشخص می‌شود. دو خاصیت مستقل خاصیت‌هایی هستند که با ثابت بودن یکی امکان تغییر دیگری وجود داشته باشد.

سیستم ساده تراکم پذیر: سیستمی است که می توان تحت تأثیر تغییر شرایط الکتریکی، مغناطیسی، جاذبه ای، حرکتی و تنش های سطحی قرار گیرد.

نکته: دما و فشار برای سیستم تک فاز مستقل از هم بوده اما در سیستم های چند فازی به یکدیگر وابسته اند پس در این شرایط داشتن دما و فشار بعنوان دو خاصیت مستقل کافی نیست.

فشار: نیروی اعمال شده به واحد سطح توسط یک سیال را فشار می خوانیم. فشار در یک عمق مشخص از مایع در تمامی جهات مقداری یکسان دارد و فقط با تغییر عمق یا ارتفاع (برای سیال ساکن) مقدار آن تغییر می کند. برای یک مخزن می توان فشار را به صورت یکنواخت در نظر گرفت زیرا مقدار چگالی یا دانسیته گازها عموماً کم است.

حداقل فشار موجود فشار مطلق صفر است و روابط زیر بین فشار نسبی و مطلق برقرار است.



Subject : Date :

دما: مقیاس دمای ترمودینامیکی در سیستم SI کلوین و در سیستم انگلیسی R رنکین بوده و در روابط زیر بین این مقیاس و مقیاس ها متداول دیگر برقرار می باشد.

$T(K) = T(°C) + 273$

$T(R) = T(°F) + 460$

$T(R) = 1.8\,T(K) \quad , \quad T(°F) = 1.8\,T(°C) + 32$

$\Delta T(R) = \Delta T(°F) \quad , \quad \Delta T(K) = \Delta T(°C)$

نکته: در روابط ترمودینامیکی حتماً از درجه حرارت (T) در مبنای K (یا R) استفاده می شود.

ماده خالص: ماده ای که دارای ترکیب شیمیایی یکسان باشد را ماده خالص می گوییم مثل نیتروژن، کربن و ... مخلوطی از عناصر و یا ترکیبات شیمیایی نیز که همگن باقی بماند تشکیل ماده خالص می دهد (مانند هوا)

مخلوط دو یا چند فاز از ماده خالص تا زمانی که ترکیب شیمیایی آن ها در تمام فازها یکسان باشد (مثلاً مخلوط یخ و آب مایع) ماده خالص است اما مخلوط گاز با مایع هوا ماده خالص نیست.

فاز: یک فاز بعنوان آرایش مولکولی که همه جا یکنواخت است و می توان آن را از دیگر آرایش ها با مرز مشخص جدا کرد تعریف می شود.

حالت های تغییر فاز: یک حالت جامد که به طور معمول برای مواد خالص ~~برای مواد خالص~~ با افزایش دما و فشار به مایع تبدیل می شود.

MICRO

مایع تحت فشار یا مادون سرد یا متراکم: اگر سیستمی داشته باشیم که تنها شامل مایع در دمایی پایین تر از دمای اشباع باشد

اصطلاحاً آن مایع را مادون سرد می نامند. با اعمال انتقال حرارت به یک مایع متراکم تحت شرایط فشار ثابت مطابق شکل زیر

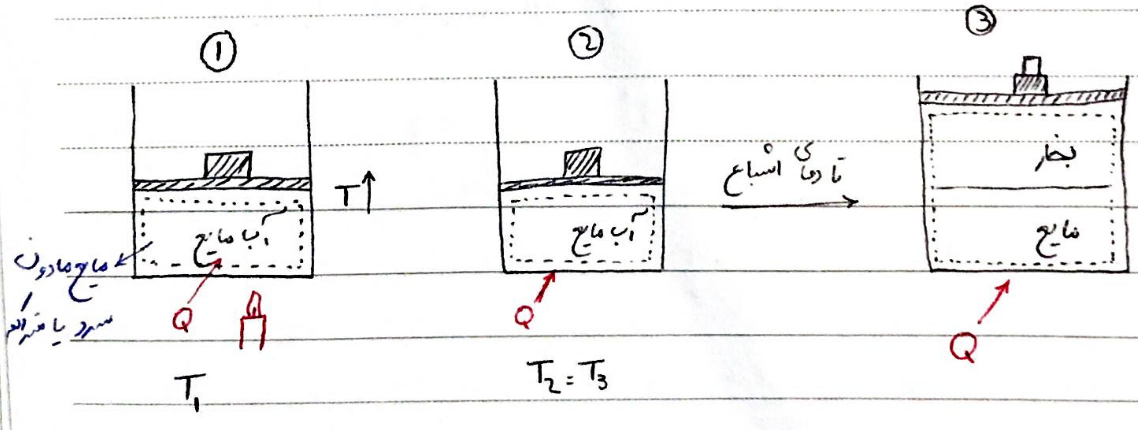
مایع به تدریج تغییر حجم پیدا می کند و دمای آن افزایش می یابد تا به شرایط مایع اشباع برسد.

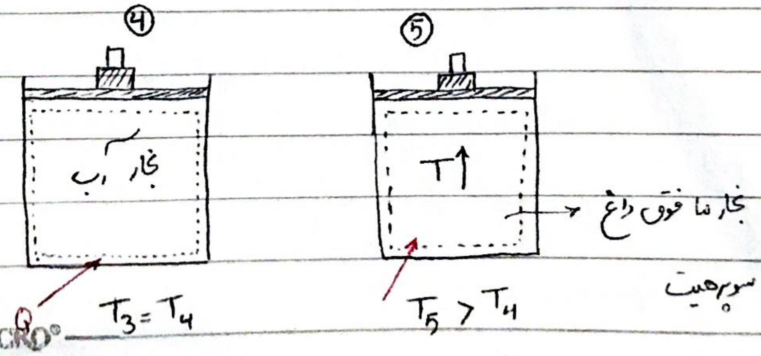
مایع اشباع: مایع اشباع شرایطی از ماده است که در فشار ثابت اعمال حرارت به آن تغییری در درجه حرارت آن ایجاد نکرده

بلکه مایع شروع به بخار شدن می کند. اگر اعمال حرارت به سیستم را ادامه دهیم فرآیند تبدیل مایع به بخار ادامه می یابد تا جایی که

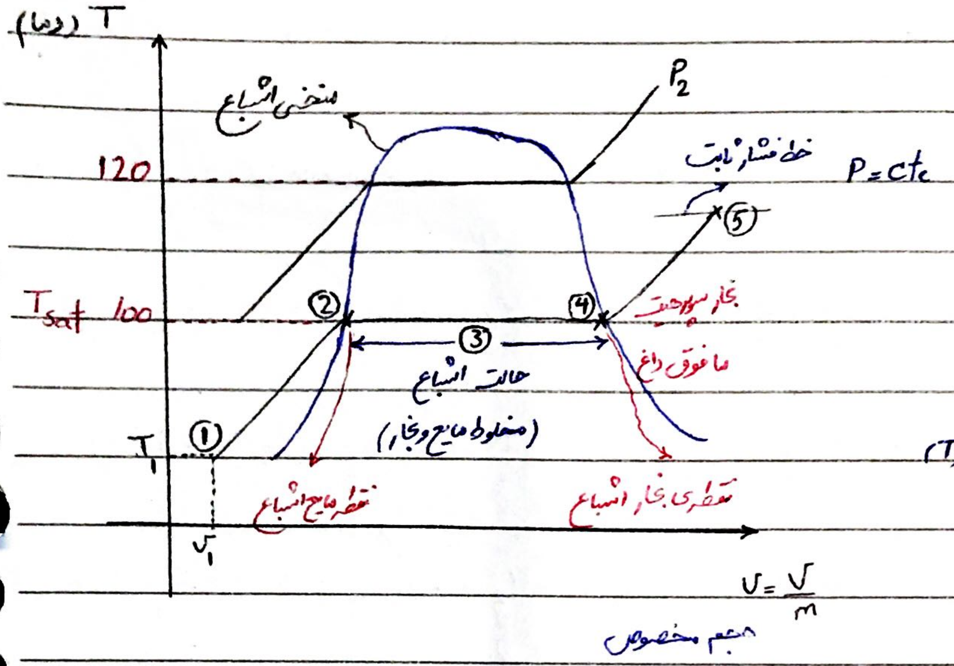
تمام مایع به بخار تبدیل شود. این حالت را حالت بخار اشباع می نامیم. با ادامه ی انتقال حرارت به سیستم دمای بخار افزایش

یافته و اصطلاحاً در ناحیه سوپرهیت یا مافوق داغ قرار می گیرد.





Subject :   Date :



$\Delta T(R) = \Delta T(°F)$, $\Delta T(K) = \Delta T(°C)$

نکته: در روابط ترمودینامیکی حتماً از درجه حرارت (T) در مبنای K یا R استفاده می‌شود.

جدول خواص ترمودینامیکی:

کیفیت: نسبت جرم بخار به جرم کل مخلوط مایع و بخار را نشان می‌دهد و داریم

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

m_g → جرم بخار ، m_f → جرم مایع ، m_g → گاز ، مخرج: جرم کل (مجموع مایع و بخار)

برای حجم مخصوص داریم:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} = \frac{V_f + V_g}{m_g + m_f} = \frac{m_f v_f + m_g v_g}{m_g + m_f}$$

(V ← حجم ، ρ ← چگالی)

$$\Rightarrow v = \frac{m_f}{m_f + m_g} v_f + \frac{m_g}{m_f + m_g} v_g \longrightarrow v = (1-x) v_f + x v_g$$

($\frac{m_g}{m_f + m_g} = x$)

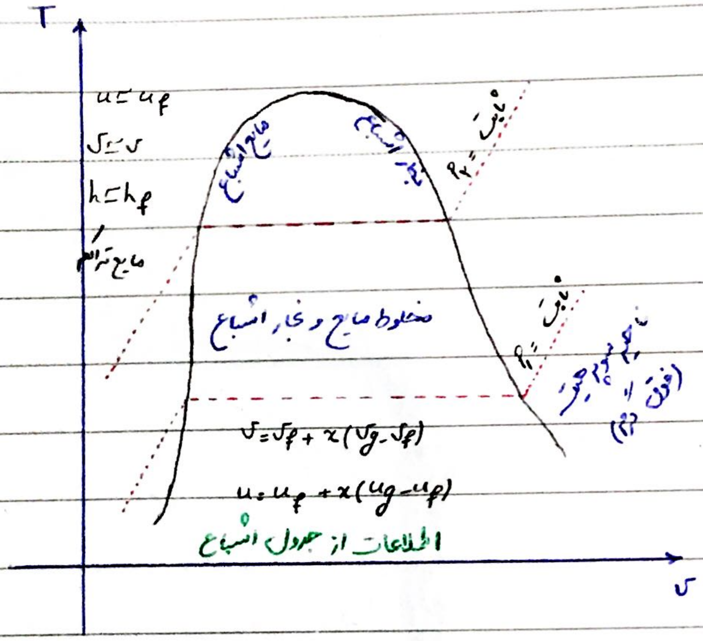
$$v = v_g + x(v_g - v_f)$$

تعریف: $v_{fg} = v_g - v_f$

$$v = v_f + x v_{fg}$$

MICRO®

اطلاعات از جدول سوپرهیت



مثال: در ظرف سربسته‌ای بحجم ۲ m^3 مایع اشباع در دمای ۴۰°C وجود دارد فشار و جرم آب را بیابید؟

T_{sat} = ۴۰°C → $P\big|_{T_s}$ = ۷,۳۸۴ → $v_f\big|_{T_s = ۴۰°C}$ = ۰,۰۰۱۰۰۸۷ $m^۳$

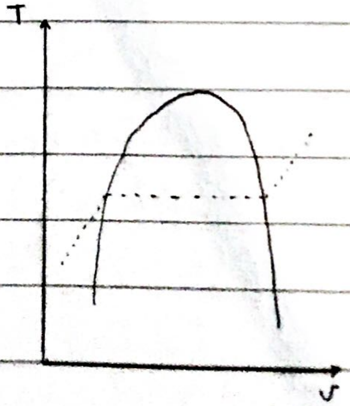
$m = \frac{V}{v}$ = ۲ / ۰,۰۰۱۰۰۸ ≃ ۱۹۸۵

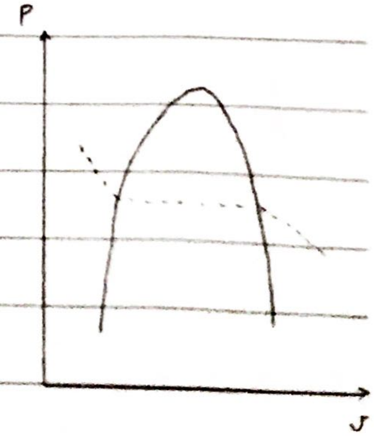
مثال: در ظرف سربسته‌ای ۲kg بخار اشباع، فشار ۲۰۰ kpa موجود است حجم ظرف و دمای بخار را بیابید؟

P_{sat} = ۰,۲ kg → T_{sat} = ۱۲۰,۲۳ °C

v_g = ۰,۸۸۵۷ $m^۳/kg$

$V = m(v_g)$ = ۲ × ۰,۸۸۵۷ = ۱,۷۷

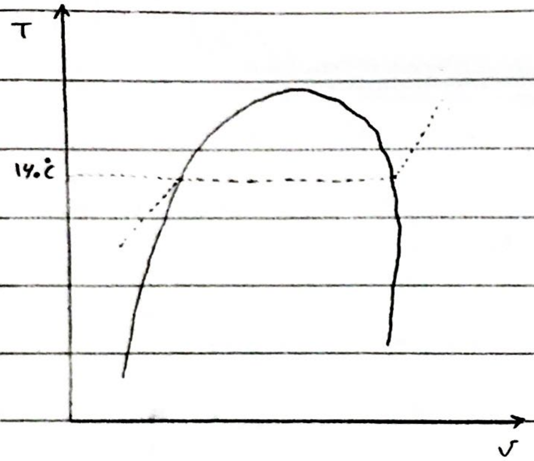




Subject : Date :

مثال: در ظرفی به حجم ۲ lit مخلوط بخار و مایع در دمای ۱۴۰°C موجود است. اگر حجم مایع ۰٫۰۵ حجم کل باشد

جرم کیفیت مخلوط و فشار مخلوط را بیابید؟



$T_{sat} = 140^\circ \xrightarrow{A.1.1} \begin{cases} v_f = 0.001102 \ m^3/kg \\ v_g = 0.3071 \end{cases}$

$m_{\text{بخار}} = \dfrac{\overbrace{0.95}^{\text{سهم حجم بخار}} \times 2 \times 10^{-3}}{0.3071} = 0.0062 \ kg$

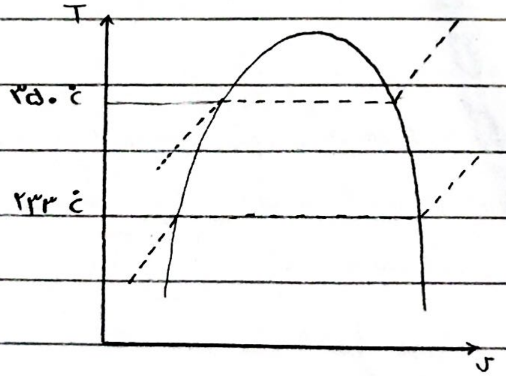
$m_{\text{مایع}} = \dfrac{0.05 \times 2 \times 10^{-3}}{0.001102} = 0.09 \ kg$

$m_{\text{کل}} = 0.0062 + 0.09 = 0.0962 \ kg$

$x = \dfrac{0.0062}{0.0962} = 0.064 = 6.4\% \longrightarrow P\Big|_{T_s = 140^\circ C} = 0.4178 \ MPa$

مثال: ۲kg آب در دمای ۳۵۰°C و فشار ۳MPa موجود است. حجم ظرف چقدر است؟

$\left.\begin{array}{l} m = 2 \ kg \\ T = 350^\circ C \\ P = 3 \ MPa \end{array}\right\} v = ?$



$v = \dfrac{V}{m}$

$\xrightarrow{A.1.2} P_s = 3MPa \longrightarrow T_s = 233.9 \qquad T_s < 350^\circ C$

پس آب در حالت مافوق گرم است

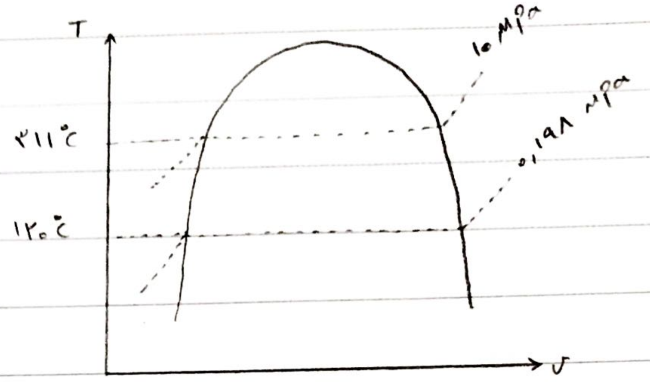
$P = 3MPa \xrightarrow[\text{سوپرهیت}]{A.1.3} v = 0.09053 \ m^3/kg$

$V = \underset{v}{(0.09053)}\underset{m}{(2)} = 0.18106 \ m^3$

مثال: ظرفی به حجم ۳ lit آب در دمای ۱۲۰°C و فشار ۱۰ MPa داریم. مقدار جرم آب چقدر است؟

$v = ۰٫۰۰۱۰۵۴۹ \ \frac{m^3}{kg}$

$m = \frac{۳ \times ۱۰^{-3}}{۰٫۰۰۱۰۵۴۹} = ۲۸٫۴ \ kg$



مثال: در ظرفی به حجم ۲۰ lit، ۰٫۰۳ kg آب در دمای ۱۱۰°C داریم. فشار و کیفیت را بیابید؟

۲۰ lit ، ۰٫۰۳ kg ، T = ۱۱۰°C

$v = \frac{۲۰ \times ۱۰^{-۳}}{۰٫۰۳} = ۰٫۶۷ \ \frac{m^۳}{kg}$ ، $T = ۱۱۰°C \xrightarrow{A.1.1} \begin{cases} v_f = ۰٫۰۰۱۰۵۲ \ \frac{m^۳}{kg} \\ v_g = ۱٫۲۱۰۲ \ \frac{m^۳}{kg} \end{cases}$

$v_f < v < v_g$

$v = v_f + x(v_g - v_f)$ ، $P = ۰٫۱۴۳۲۷ \ MPa$

$۰٫۶۷ = ۰٫۰۰۱۰۵۲ + x(۱٫۲۱۰۲ - ۰٫۰۰۱۰۵۲) \Rightarrow x = ۰٫۵۵۳ = ۵۵٫۳\%$

مثال: ۳۰ lit آب به وزن ۰٫۰۳ kg در فشار ۱۰۰ kPa داریم. دما و کیفیت بخار چقدر است؟

۳۰ lit ، ۰٫۰۳ kg ، ۱۰۰ kPa

T = ? ، x = ?

$v = \frac{۳۰ \times ۱۰^{-۳}}{۰٫۰۳} = ۱ \ \frac{m^۳}{kg}$ $v = v_f + x \, v_{fg} \rightarrow x = ۰٫۵۹ = ۵۹\%$

$P_s = ۱۰۰ \ kPa \begin{cases} v_f = ۰٫۰۰۱۰۴۳ \\ v_g = ۱٫۶۹۴ \end{cases}$ $T = ۹۹٫۶۳°C$

$T_{sat} \Big| P_s = ۱۰۰ \ kPa$

Subject :

Date :

مثال: مخزنی به حجم ۵۰ lit به جرم ۰٫۹۱۶۲kg و فشار ۴MPa داریم

۵۰ lit ، ۰٫۹۱۶۲ kg ، $P = ۴ MPa$ $T = ؟$

پس ما فوق گرم داریم:

حجم مخصوص $v = \frac{۵۰ \times ۱۰^{-۳}}{۰٫۹۱۶۲} = ۰٫۰۵۴۵۷ \; m^۳/kg$ از جدول سوپرهیت ← $\left\{ \begin{array}{l} v = ۰٫۰۵۴۵۷ \; m^۳/kg \\ P = ۴ MPa \end{array} \right.$

$v_g \Big|_{P_s = ۴MPa} = ۰٫۰۴۹۷۸ \; m^۳/kg < v$ $T = ۲۷۵ °C$

مثال: مخزن ۱۰۰ lit آب با جرم ۱٫۷۱۲ kg در دمای ۳۵۰°C موجود است فشار این آب را بیابید؟

۱۰۰ lit ، ۱٫۷۱۲ kg ، $T = ۳۵۰ °C$ ، $P = ؟$

$v = \frac{۱۰۰ \times ۱۰^{-۳}}{۱٫۷۱۲} = ۰٫۰۵۸۴$ $\left. \begin{array}{l} v = ۰٫۰۵۸۴ \\ T = ۳۵۰ °C \end{array} \right\} \rightarrow P = ۴۵ MPa$

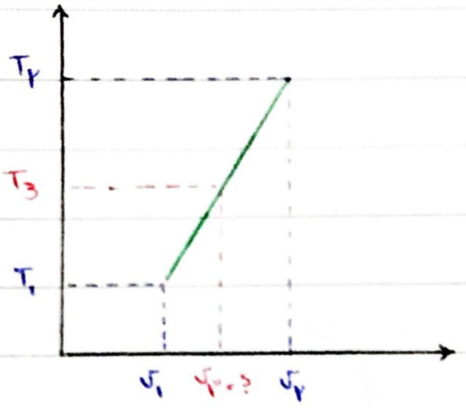
$v_g \Big|_{T = ۳۵۰ °C} = ۰٫۰۰۸۸۱۳ \; m^۳/kg < v$

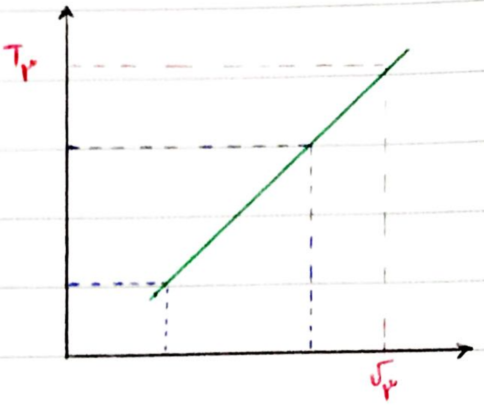
نکته: درون یابی و برون یابی: در مواردی که داده مورد نظر بین دو مقدار از داده های موجود در جدول قرار گرفته باشد با استفاده از تقریب خطی از درون یابی استفاده می کنیم. در مواردی که داده مورد نظر خارج از محدوده داده های موجود جدول است مشابه حالت قبل از برون یابی استفاده می کنیم.

مثال: دما و حجم مخصوص مایع اشباع در فشار ۲۲۳MPa را برحسب داده های زیر بیابید؟

MICRO®

Subject: Date:





$$\frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{v_3 - v_1}{v_2 - v_1} \qquad \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{v_3 - v_1}{v_2 - v_1}$$

$$T = 120.20 + \frac{124 - 120.23}{0.225 - 0.2} = 123.7\ ^\circ C$$

$$v = 0.001001 + \frac{0.001004 - 0.001001}{0.225 - 0.2}(0.223 - 0.2) = 0.0010012\ \frac{m^3}{kg}$$

P	T	v_f
0.2	120.23	0.001001
0.225	124	0.001004

معادله حالت

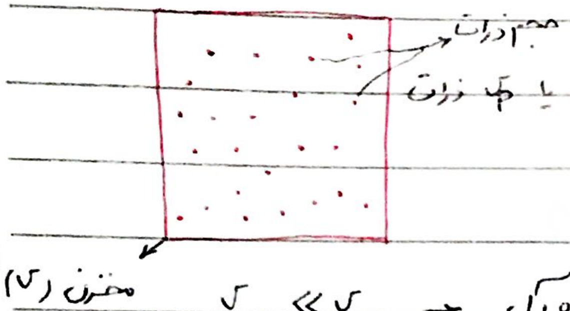
هر معادله یا رابطه‌ای که فشار، دما و حجم مخصوص را به هم ربط دهد معادله‌ی حالت نامیده می‌شود.

یادآوری: پس از تبدیل فاز مایع به بخار شکل بخار به صورتی است که به شرایط میعان نزدیک است به همین خاطر آن را بخار می‌نامیم

اما وقتی دمای فاز بخار یک ماده از دمای بحرانی بالاتر باشد آن را گاز می‌نامیم.

گاز کامل: گازی که حجم ذراتش نسبت به حجم کل سیستم مخزن قابل صرف‌نظر کردن باشد گاز کامل خوانده می‌شود.

معادله حالت گاز ایده آل :



$PV = RT$

$R = \frac{R_u}{M} = \bar{R}\left(\frac{kJ}{kg\,K}\right)\left(\frac{kPa\,m^3}{kg\,K}\right)$

$PV = mRT$

$V_{\text{ذرات}} \ll V_{\text{مخزن}} \rightarrow$ گاز ایده آل

$v = \frac{RT}{P}$

ضریب تراکم پذیری : $Z = \frac{v_{real}}{v_{ideal}}$ این ضریب نشانگر انحراف گاز از حالت گاز کامل است.

قانون اول ترمودینامیک : همانطور که گفته شد انرژی تولید نمی شود و از بین نمی رود بلکه تنها تغییر شکل می دهد تبادل انرژی با یک سیستم از طریق کار یا حرارت می باشد

حرارت: حرارت انرژی در حال گذر است که هنگام عبور از مرزهای یک سیستم شناخته می شود بنابراین در ترمودینامیک حرارت به معنای انتقال حرارت است.

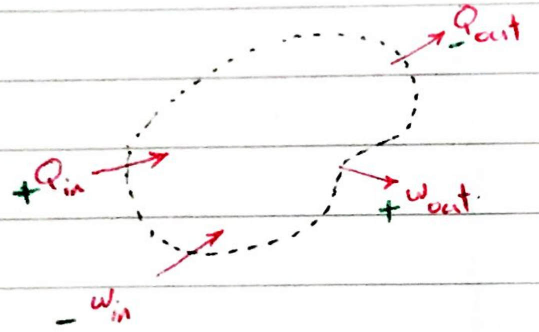
کار: توانایی انجام کار شکلی از انرژی است که در عبور از مرزهای یک سیستم مشاهده می شود.

نکته: کار و انرژی هردو توابع مسیری و وابسته به مسیر هستند یعنی نحوه ی تبادل آن ها با سیستم در مقدارشان موثر است.

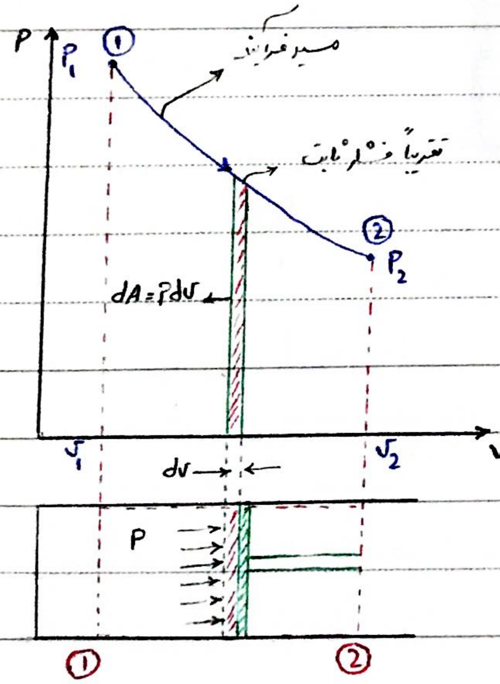
نکته: یک سیستم دارای انرژی است نه کار و حرارت.

MICRO

قرارداد: ۲ طور پیش فرض حرارت منتقل شده به سیستم و کار دریافتی از آن را با علامت (+) می‌شناسیم و تبادل کار و حرارت در جهت عکس را با علامت (-) شناسایی می‌کنیم.



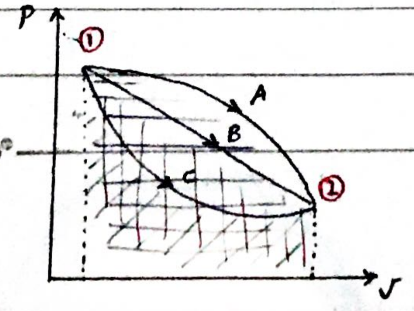
اشکال کار مکانیکی: ۱- کار مرزی: کاری که به واسطه‌ی انبساط و انقباض در مرزهای سیستم رخ می‌دهد اصطلاحاً کار مرزی خوانده می‌شود (کار مرز متحرک)



$$W_{\text{مرزی}} = \int F.dr = \int PA\,dx = \int P\,dv$$

کار وابسته به مسیر است

برای انجام یک کار مرزی بین دو نقطه مسیرهای مختلفی وجود دارد که بسته به این مسیر مقدار کار متفاوت می‌باشد



B
C
A

Subject :　　　　　　　　　　　　　　　　　　Date :

کارهای مرزی در فرآیندها : برای سادگی بررسی انواع کارهای مرزی ⟸ آن‌ها را در اشکال حجم ثابت، فشار ثابت، دما ثابت و ثابت (ISO)

پلی تروپیک بررسی می‌کنیم.

فرآیند حجم ثابت : در نمودار P-V ⟵ $dV=0 \Rightarrow W=0$ فشل مرزی دادن به یک جسم صلب $\Delta V=0 \Rightarrow W=0$

فرآیند فشار ثابت : $P=$ ثابت (cte) $\Rightarrow W=\int_{V_1}^{V_2} P\,dV = P(V_2-V_1)$

فرآیند دما ثابت (برای گاز کامل) : $T_1=T_2$, $\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2} \Rightarrow P_1V_1=P_2V_2$, $PV=mRT=$ ثابت

(ثابت مولکولی)

$PV=C \rightarrow P=\frac{C}{V}$ ⟵ عدد ثابت

$$W=\int P\,dV=\int \frac{C}{V}\,dV = C\int \frac{dV}{V} = C\ln V$$

$$W=C\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)=P_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} = P_2V_2 \ln\frac{V_2}{V_1} \rightarrow P_1V_1=P_2V_2 \rightarrow \frac{V_2}{V_1}=\frac{P_1}{P_2} \Rightarrow W=P_1V_1 \ln\frac{P_1}{P_2}$$

فرآیند پلی تروپیک :

$PV^n=$ ثابت $\rightarrow P=$ ثابت

ISO bar : فشار ثابت (فرآیند هم فشار)

$n=1 \rightarrow PV=$ ثابت $\rightarrow T=$ ثابت

ISO Them : دما ثابت (هم دما)

$\lim V_1^n = \lim V_2^n \rightarrow V_1=V_2 \rightarrow$ ISO volume

هم حجم یا حجم ثابت

MICRO

AMIN

0939

Subject :   Date :

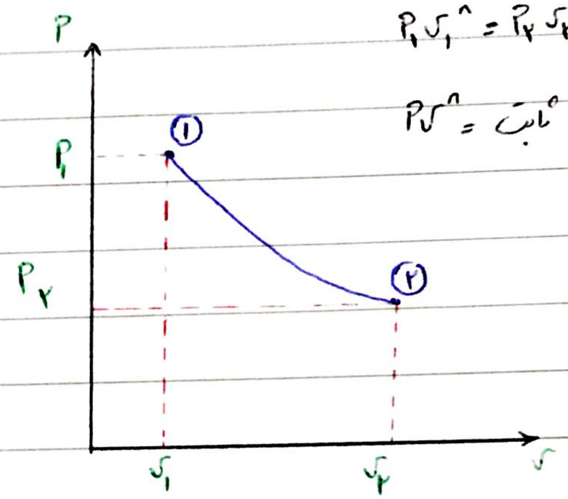
$$Pv^n = C \Rightarrow P = \frac{C}{v^n} = Cv^{-n}$$

$$w = \int P dv = \int Cv^{-n} dv = C \frac{v^{1-n}}{1-n} \Rightarrow w = C \frac{v_2^{1-n} - v_1^{1-n}}{1-n} = \frac{P_2 v_2^n v_2^{1-n} - P_1 v_1^n v_1^{1-n}}{1-n}$$

$$\Rightarrow n \neq 1 \Rightarrow w = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n}$$

$$n = 0 \Rightarrow w = P_2 v_2 - P_1 v_1$$

$$n \to \infty \Rightarrow w = \lim_{n \to \infty} \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{n} = 0$$



$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$

$Pv^n =$ ثابت

قانون اول ترمودینامیک برای سیستم بسته: بیان می‌کند که در واکنش یک سیستم با محیط مقدار انرژی که سیستم دریافت می‌کند دقیقاً برابر انرژی است که محیط از دست می‌دهد برای یک حجم با جرم ثابت (سیستم بسته) انرژی به دو شکل کار و حرارت از مرزهای سیستم عبور می‌کند و این انرژی منجر به تغییرات سطح انرژی سیستم بسته می‌شود.

$$dE = \Delta Q - \Delta w \qquad Q - w = \Delta E$$

(ΔQ و Δw): به مسیر وابسته است
به نقاط بستگی ندارد

نکته: از آنجا که کار و حرارت توابع وابسته به مسیر هستند به صورت دیفرانسیل کامل نشان داده نشده‌اند اما تغییرات انرژی سیستم چون وابسته به حالت سیستم است به صورت دیفرانسیل کامل نشان داده شده اند.

تغییرات انرژی یک سیستم بسته به صورت زیر نشان داده می‌شود $\Delta E = \Delta U + \Delta K_E + \Delta P_E$

تغییرات انرژی داخلی یک سیستم بر اساس مقدار انرژی داخلی در هر حالت قابل محاسبه است $\Delta U = m(u_2 - u_1)$

حرارت مخصوص: مقدار انرژی حرارتی که برای تغییر دما برای جرم معینی از ماده مورد نیاز است اصطلاحاً گرمای ویژه خوانده می‌شود. فرآیند گرمای ویژه به دو صورت گرمای ویژه در حجم ثابت و گرمای ویژه در فشار ثابت تعریف می‌شود. طبق تعریف داریم:

$$C_v = \frac{\partial u}{\partial T}\bigg|_{v = \text{ثابت}} \qquad C_p = \frac{\partial h}{\partial T}\bigg|_{p = \text{ثابت}}$$

گرمای ویژه حجم ثابت ← C_v ؛ انرژی داخلی ← u ؛ دما ← T ؛ حجم ← v

گرمای ویژه فشار ثابت ← C_p ؛ آنتالپی ← h ؛ دما ← T ؛ فشار ← p

$$\Delta h = \Delta u + w$$

$$h = u + Pv$$

آزمایش ژول

آنتالپی: بیرون در بسیاری از فرآیندهای ترمودینامیکی به خصوص در سیستم‌های باز ترکیبی از سه خاصیت انرژی داخلی، فشار و حجم ظاهر می‌شود

که اصطلاحاً آن را آنتالپی می‌نامیم و با توجه به اینکه هر سه‌ی این خواص وابسته به حالت یا وضعیت ماده می‌باشند آنتالپی نیز

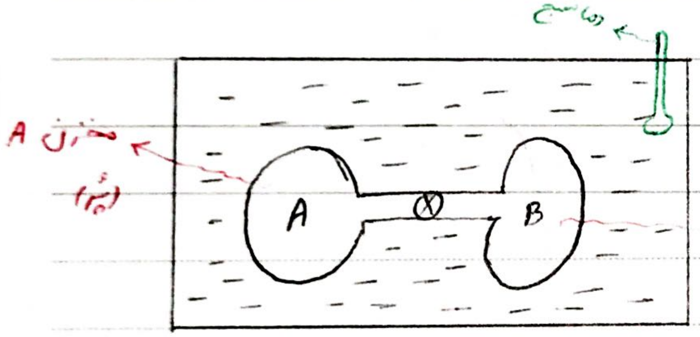
یک خاصیت ترمودینامیکی می‌باشد و داریم:

$$H = U + PV$$

در واحد جرم

$$h = u + Pv$$

آزمایش ژول: ژول با استفاده از تجهیز زیر نشان داد که برای گاز کامل انرژی داخلی تنها تابعی از دما است



در این تجهیز دستگاه که پر از گاز کامل است از طریق شیری

به مخزن B متصل می‌باشد و هر دوی آنها درون محفظه‌ای از

آب که به صورت دقیق کنترل می‌شود قرار دارد. اگر مخزن B

کاملاً تخلیه شده باشد پس از باز کردن شیر گاز از مخزن A وارد آن شده و فشار و حجم گاز تغییر می‌کند و داریم

در شیر، برای گاز ایده‌آل: $u = g(T)$ $\xrightarrow{\text{زیرا}}$ $Q = u_2 - u_1 + w$ $(Q = 0 \ , \ w = 0)$

$\rightarrow u_2 = u_1 \rightarrow u \neq \gamma(P, v) \Rightarrow u = g(T)$

تابع سای — فقط تابع دما

برای گاز کامل: $h = u + Pv \rightarrow dh = du + d(Pv)$

$$dh = du + d(RT) = du + RdT$$

$$\Rightarrow c_p dT = c_v dT + RdT$$

$$\Rightarrow c_p = c_v + R$$

یا $c_p - c_v = R$ برای گاز کامل

MICRO

Subject :

Date :

محاسبه تغییرات انرژی داخلی و آنتالپی گاز کامل برحسب گرماهای ویژه:

اگر $h = h(T)$

گرماهای ویژه تابع دما نیست : روش اول

$\Rightarrow c_p , c_v =$ ثابت

$dh = \int c_{p_0} dT \rightarrow h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$

روش دوم: با استفاده از توابع تغییرات c_p و c_v برحسب دما (جدول A.9 ون وایلن)

$$dh = \int_{T_1}^{T_2} c_{p_0} \, dT$$

روش سوم: با استفاده از جداولی که مقادیر h در هر دما نسبت به دمای مرجع $25^\circ C$ داده شده است.

جداول A.11 , A.10 ون وایلن

$$h_T = \int_0^T c_{p_0} \, dT \quad \text{و} \quad h_{T_2} - h_{T_1} = \int_{T_0}^{T_2} - \int_{T_0}^{T_1} c_p \, dT$$

قانون بقای جرم برای سیستم و حجم کنترل:

$$\frac{dm_{sys}}{dt} = 0$$ برای سیستم (از تعریف)

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} + \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_i = 0$$ برای سیستم باز (حجم کنترل)

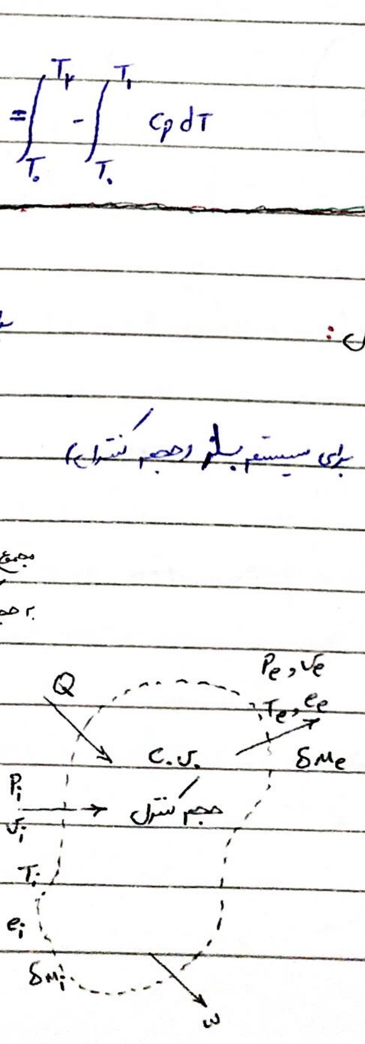
$\sum \dot{m}_e$: مجموع جرم‌های خروجی از حجم کنترل

$\sum \dot{m}_i$: مجموع جرم‌های ورودی به حجم کنترل

اصل بقای انرژی برای حجم کنترل

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2$$

برای چنین سیستمی می‌توان در حالت کلی با وجود چنین ورودی و خروجی نوشت



MICRO

Subject: معادله کلی بقای انرژی از روی قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل Date:

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i\right) = \frac{dE_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) + \dot{W}_{c.v}$$

آنتالپی — اندازه حرکت (انرژی جنبشی) — ارتفاع

فرآیند حالت دائمی - جریان دائمی

Steady state - steady flow (SSSF)

در چنین فرآیندهایی فرض می‌شود که ۱- حجم کنترل نسبت به چارچوب مختصات ثابت، مرز متحرک نداریم

۲- همانند جرم داخل حجم کنترل حالت جرم در هر نقطه از حجم کنترل در طول زمان ثابت است.

$$\Rightarrow \frac{dE_{c.v}}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{dm_{c.v}}{dt} = 0 \qquad \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{c.v} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i\right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) + \dot{W}_{c.v}$$

اگر یک ورودی و یک خروجی داشته باشیم

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

$$\dot{Q}_{cv} + \dot{m}\left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i\right) = \dot{m}\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) + \dot{W}_{c.v}$$

با تعریف

$$q_{cv} = \frac{\dot{Q}_{c.v}}{\dot{m}} \quad , \quad w_{cv} = \frac{\dot{W}_{c.v}}{\dot{m}}$$

$$q_{cv} + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e + w_e$$

فرآیند حالت یکنواخت - جریان یکنواخت (USUF)

برای چنین فرآیندهایی فرض می‌شود که ۱- حجم کنترل ثابت بوده که مرز متحرک هستیم

۲- حالت جرم در هر نقطه از حجم کنترل می‌تواند با زمان تغییر کند ولی در هر لحظه حالت جرم در تمام نقاط داخل سیستم یکسان است.

MICRO®

Subject :

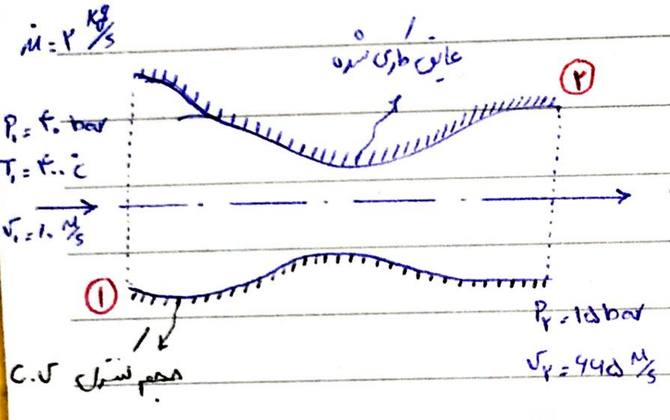
Date :

۲- علت: جرم درون سیستم با زمان ثابت است هرچند ممکن است مقدار جرم عبوری با زمان تغییر کند در این شرایط قانون اول برای یک حجم کنترل تحت شرایط USUF خواهد شد.

$$Q_{c.v} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i\right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) + \left[m_2\left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2\right) - m_1\left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1\right)\right] + W_{c.v}$$

MICRO®

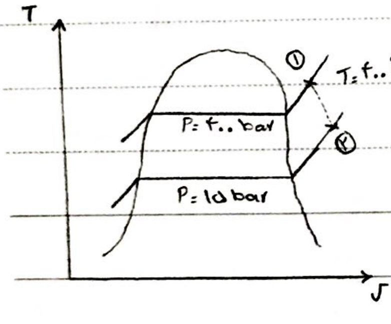
مثال: بخار وارد یک نازل همگرا - واگرایی مطابق شکل می‌گردد. اگر فشار و دما در ورودی ۴۰ بار و $400^\circ C$ باشد و سرعت جریان $10\ m/s$ با فرض انتقال حرارت ناچیز و تغییرات انرژی پتانسیل اندک در نازل مطلوب است محاسبه مساحت خروجی نازل به طوری که جریان جرمی $2\ kg/s$ در فشار $15\ bar$ و سرعت $665\ m/s$ از آن خارج شود؟



فرضیات: جریان پایدار (پایا) بدون تغییرات در طول زمان است.

- کار تبادل شده با محیط و انتقال حرارت با محیط صفر است. $\dot{Q}_{C.V} = \dot{W}_{C.V} = 0$
- انرژی پتانسیل تغییرات ناچیزی دارد.

حل: بررسی وضعیت فرآیند روی نمودار



مساحت خروجی نازل با توجه به مقدار شدت جریان جرمی: $A_2 = \frac{\dot{m} v_2}{V_2}$

از قانون بقای انرژی قانون اول ترمودینامیک برای فرآیند SSSF داریم:

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \dot{Q}_{C.V} - \dot{W}_{C.V} + \dot{m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) - \dot{m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right)$$

$$\Rightarrow 0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) \Rightarrow h_2 = h_1 + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right)$$

از جدول: سوپرهیت: $h_1 = 3213.6\ \frac{kJ}{kg}$ +

$$+\left[\frac{(10)^2 - (665)^2}{2}\right]\left(\frac{m^2}{s^2}\right) \times \frac{1}{1000}\left(\frac{kJ}{J}\right) = 2992.5\ \frac{kJ}{kg}$$

$P_2 = 15\ bar$, $h_2 = 2992.5\ \frac{kJ}{kg}$

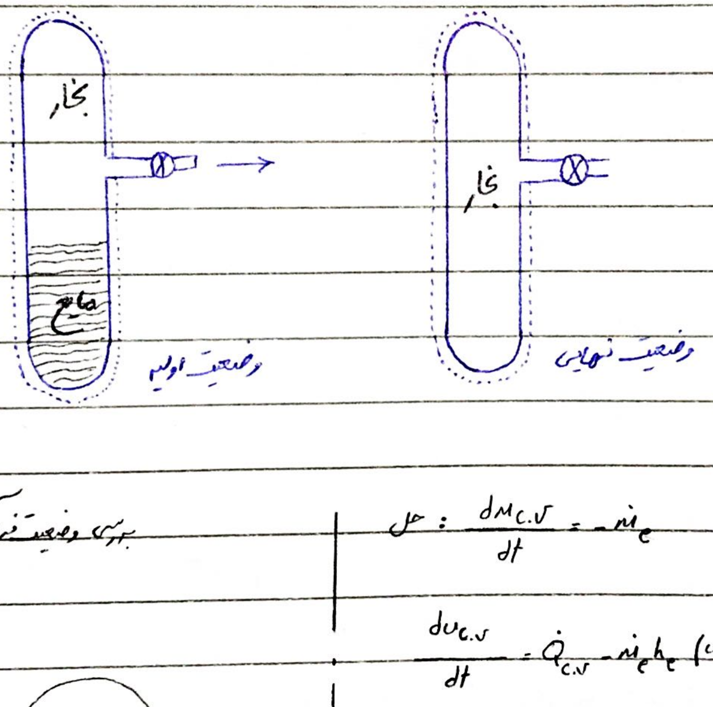
↓

$$v_2 = 0.1627\ \frac{m^3}{kg} \Rightarrow A_2 = \frac{(2\ \frac{kg}{s})(0.1627\ \frac{m^3}{kg})}{665\ \frac{m}{s}} = 4.89 \times 10^{-4}\ m^2$$

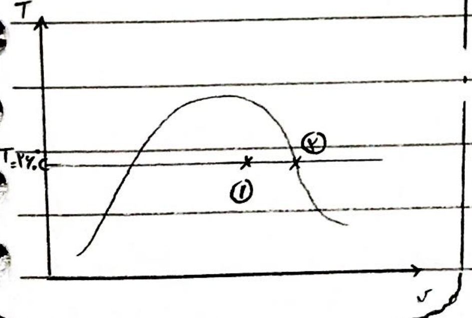
مثال: مخزنی با حجم $0.85\ m^3$ دارای آب به صورت مخلوط مایع و بخار در دمای $260\ ^\circ C$ است. اگر کیفیت مخلوط 0.7 باشد و بخار اشباع در دمای $260\ ^\circ C$ به آرامی از یک شیر تنظیم کننده فشار در بالای مخزن به گونه‌ای خارج شود که انرژی منتقل شده توسط حرارت فشار مخزن را ثابت نگه دارد مطلوب است یافتن مقدار انتقال حرارت با نادیده گرفتن تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل برای ادامه فرآیند فوق تا زمانی که مخزن توسط بخار اشباع $260\ ^\circ C$ کاملاً پر شود؟

فرضیات: - کار انجام شده صفر است $W_{c.v} = 0$

- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است
- در خروجی حالت ثابت باقی می‌ماند
- وضعیت اولیه و نهایی مخزن در حالت تعادل می‌باشد.



بررسی وضعیت فرآیند روی نمودار



حل: $\frac{dm_{c.v}}{dt} = -\dot{m}_e$ دبی جرمی خروجی

$\frac{dU_{c.v}}{dt} = \dot{Q}_{c.v} - \dot{m}_e h_e$ (از قانون اول برای فرآیند USUF)

با ترکیب روابط فوق: $\frac{dU_{c.v}}{dt} = \dot{Q}_{c.v} + h_e \frac{dm_{c.v}}{dt}$

با انتگرال‌گیری: $\Delta U_{c.v} = Q_{c.v} + h_e \Delta m_{c.v}$

$\Rightarrow Q_{c.v} = (m_2 u_2 - m_1 u_1) - h_e (m_2 - m_1)$

از جدول مایع و بخار اشباع ← $u_1 = u_f + x(u_g - u_f)$

$= 1128.4 + (0.7)(2599.0 - 1128.4) = 2157.8\ \frac{kJ}{kg}$

همچنین : $v_2 = v_f + x_1(v_g - v_f) = 1,2755\times10^{-3} + (0,7)(0,04221 - 1,2755\times10^{-3}) = 29,93\times10^{-3}\ m^3/kg$

$$m_1 = \frac{V}{v_1} = \frac{0,85\ m^3}{29,93\times10^{-3}\ m^3/kg} = 28,4\ kg$$

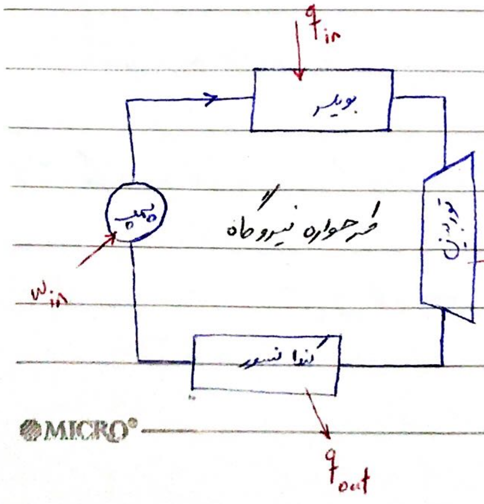
از جدول مایع و بخار اشباع $\Rightarrow u_2 = u_g\Big|_{T=240^\circ C} = 2599,0\ kJ/kg$, $v_2 = v_g\Big|_{T=240^\circ C} = 42,21\times10^{-3}\ m^3/kg$

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0,85\ m^3}{42,21\times10^{-3}\ m^3/kg} = 20,14\ kg$$

$$h_e = h_g\Big|_{T=240^\circ C} = 2796,4\ kJ/kg \Rightarrow Q_{c.v} = (20,14)(2599,0) - (28,4)(2157,8) - 2796,4(20,14 - 28,4) = 14,192\ kJ$$

$$Q = 14,192\ kJ$$

قانون دوم ترمودینامیک : ماشین یا موتور حرارتی سیستمی است که در یک چرخه یا سیکل کار می‌کند و با محیط خود تبادل کار و گرما دارد به طوری که کار خالص سیستم مثبت است مانند نیروگاه بخار، موتور اتومبیل، موتور جت و ...



$w_{out} = w_{توربین} - w_{پمپ} > 0$

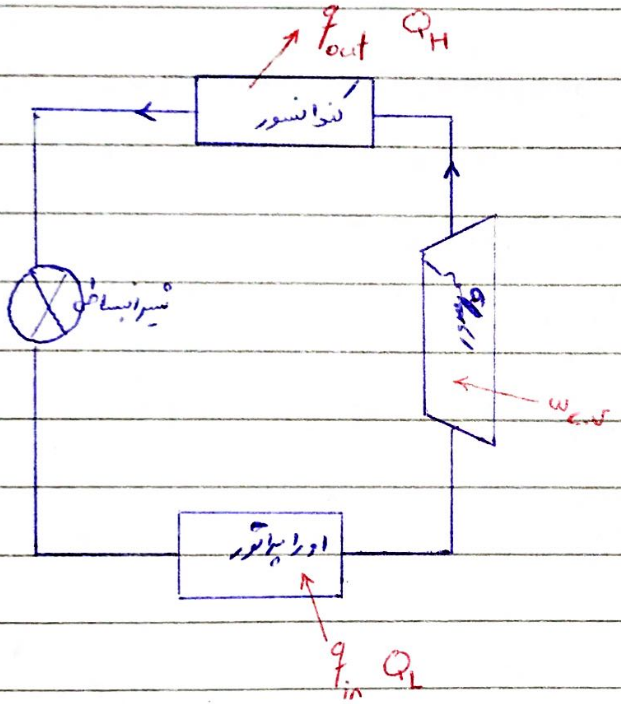
$Q = q_{in} - q_{out} = Q_H - Q_L$

منبع دما بالا (Q_H) — منبع دمای پایین (Q_L)

Subject :

Date :

پمپ حرارتی: سیستمی است که در یک سیکل یا چرخه کار می‌کند و با محیط تبادل کار و گرما داشته به طوری که کار خالص منفی و حرارت مبادله شده‌ی خالص نیز منفی می‌باشد مانند کولر گازی و انواع چرخه‌های یخچال



$W_{net} = -W_c < 0$ (net ← خالص، c ← کمپرسور)

$Q = -Q_H + Q_L$

منبع حرارتی: جسمی یا سیستمی است که می‌توان مقادیر قابل توجهی گرما از آن گرفت و یا به آن گرما داد بدون آنکه دمای آن تغییر کند مانند جو یا اتمسفر، دریاچه‌ها و یا هر محیطی که حجم آن بسیار بزرگ باشد.

راندمان یا بازده حرارتی: الف) برای یک موتور گرمایی یا حرارتی عبارت است از مقدار کاری که موتور انجام می‌دهد به مقدار انرژی گرمایی یا حرارتی که باید صرف شود (هزینه شود) تا این کار بدست آید به بیان دیگر:

(1) $\eta_{th} = \dfrac{W_{net}}{Q_H}$ (net ← خالص)

$\oint \delta Q = \oint \delta W \Rightarrow Q_H - Q_L = W_{net}$ (Q دمای)

MICRO

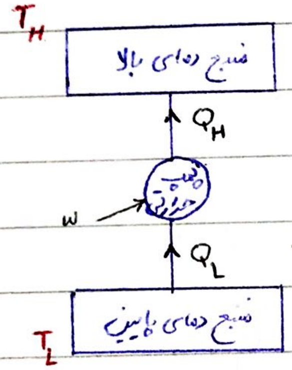
Subject: CHP سیستم‌های تولید همزمان (internet)

Date:

برای $\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

$\eta_{th} = 100\% \Rightarrow Q_L = 0$ (که نشان داده می‌شود غیرممکن است)

ب) برای یک پمپ حرارتی مفهوم بازده یا راندمان با تعریف ضریب کارایی (عملکرد) جایگزین می‌شود. ضریب کارایی پمپ حرارتی عبارت است از نسبت انرژی مفیدی که منتقل می‌گردد به مقدار انرژی‌ای که (کاری که) صرف انتقال بین انرژی می‌شود به عبارت دیگر:



ضریب عملکرد (کارایی) پمپ حرارتی: $\beta_{\text{سرمایش}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$

در صورت استفاده از پمپ حرارتی برای گرمایش

$$\beta_{\text{گرمایش}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

$$\beta_{\text{گرمایش}} = 1 + \beta_{\text{سرمایش}}$$

$$\beta_{\text{گرمایش پمپ حرارتی}} > 1$$

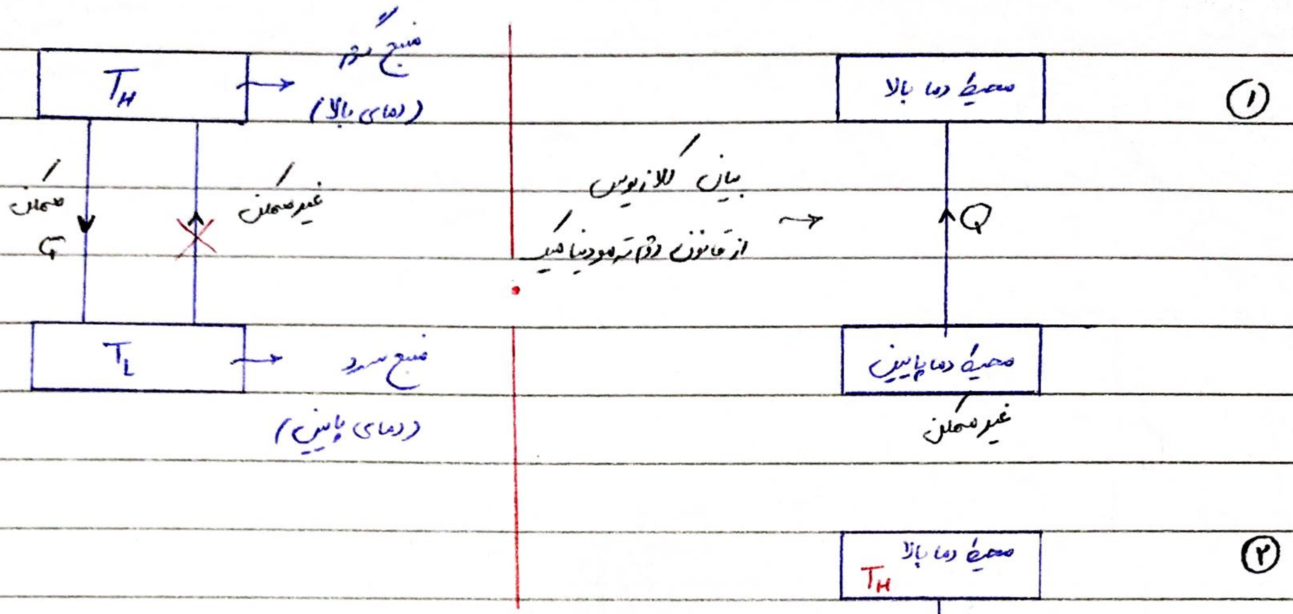
بیان قانون دوم ترمودینامیک: بر اساس سیستم‌های تولید توان یا انتقال حرارت دو بیان مختلف برای قانون دوم ترمودینامیک به شرح زیر موجود است

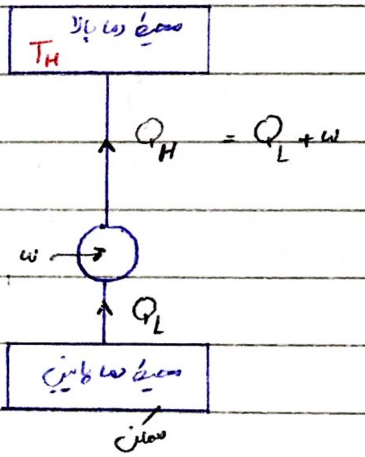
۱) بیان کلازیوس: غیرممکن است بتوان دستگاهی ساخت که در یک سیکل یا چرخه کار کند و حرارت را از منبع سرد به منبع گرم منتقل کند و هیچ اثر دیگری روی محیط نداشته باشد.

MICRO

Subject :

Date :





بیان کلوین پلانک: غیرممکن است بتوان دستگاهی ساخت در یک چرخه بتواند کار کند و از یک یا چند منبع حرارتی دما گرفته

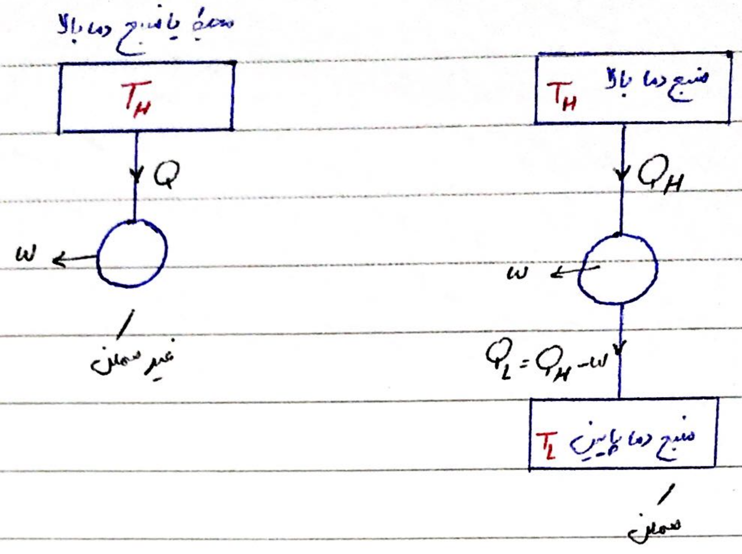
و همه این گرما را به کار تبدیل کند

بنابراین بازده حرارتی ٪ 100 غیرممکن است

نکته: می‌توان اثبات نمود که بیان کلوین پلانک معادل بیان کلازیوس می‌باشد.

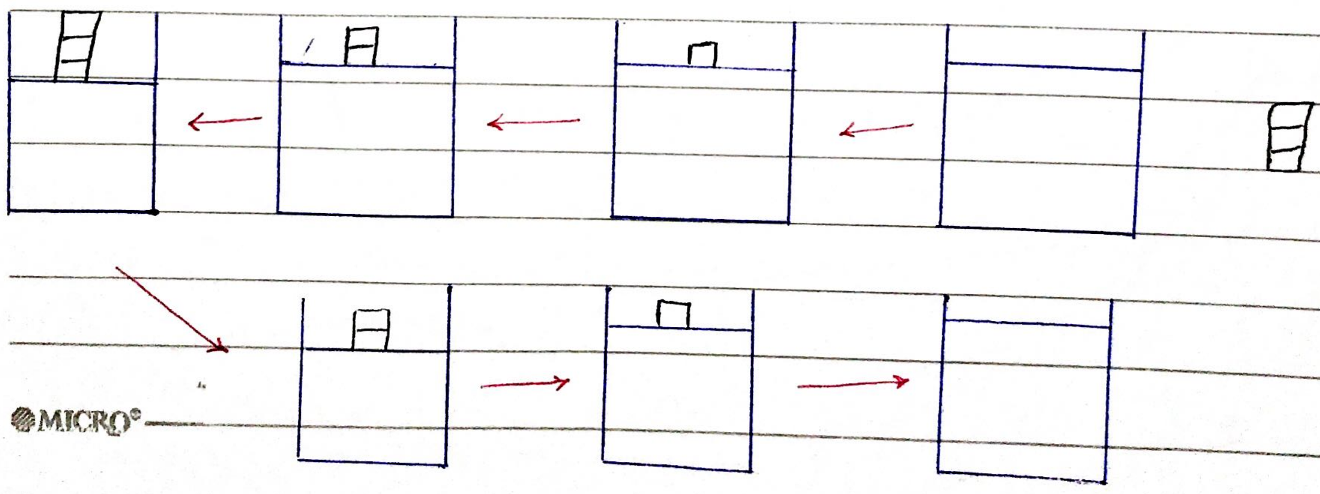
Subject : Date :

بیان کلوین از قانون دوم ترمودینامیک



نکته: اصلی ترین عواملی که باعث عدم دستیابی به بازده ۱۰۰ ٪ میشود وجود عوامل بازگشت ناپذیری در فرآیندها می باشد. نمونه هایی از بازگشت ناپذیری در فرآیندها عبارت اند از: مخلوط شدن دو ماده ی مختلف، وجود اصطکاک بین اجزای متحرک و ثابت، انبساط یا انقباض ناگهانی.

فرآیند برگشت پذیر: فرآیندی است که اگر انجام شود می توان سیستم و محیط را مجدداً به حالت اولیه برگرداند. نمونه ای از فرآیندهای برگشت پذیر در الگوهای شبه تعادلی مطابق شکل زیر قابل دستیابی است.



MICRO®

Subject :

Date :

نکته: هر فرآیندی که در مسیر رفت و برگشت دقیقاً از یک سری نقاط یا حالت های تعادلی مشابه عبور کند در نتیجه مسیر رفت و برگشت آن بر هم منطبق باشد فرآیند برگشت پذیر داخلی خوانده می‌شود.

نکته: هر فرآیند برگشت پذیری را می‌توان به صورت مجموع دو فرآیند برگشت پذیر دما ثابت و بی دررو یا آدیاباتیک در نظر گرفت.

نامعادله کلازیوس: می‌توان نشان داد که همواره داریم $\oint \delta Q = Q_H - Q_L \geq 0$ و برای هر ماشینی به سادگی می‌توان

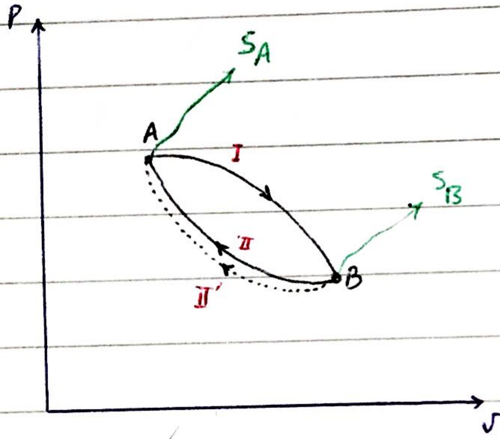
اثبات کرد که $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ نامعادله کلازیوس

آنتروپی خاصیت سیستم بسته:

MICRO®

Subject :   Date

آنتروپی: می‌توان مستقل از مسیر رفت و برگشت در یک فرآیند برگشت ناپذیر نشان داد که کمیتی که به صورت $\frac{\Delta Q}{T}$ نشان داده می‌شود مستقل از مسیر بوده و برای هر نقطه (حالت یا state) روی نمودار حالت وضعیت مقدار مشخصی دارد که از جداول قابل استخراج است. کمیت مذکور را آنتروپی می‌خوانیم و داریم:



$$S = \frac{\Delta Q}{T}$$

اصل افزایش آنتروپی: بیان می‌کند که برای هر فرآیند مجموع تغییرات آنتروپی مقداری مثبت و در حالت ایده‌آل برابر صفر است.

$$ds_{\text{سیستم}} \geq \frac{\Delta Q}{T}$$

$$ds_{\text{محیط}} = -\frac{\Delta Q}{T_0}$$

$$\Rightarrow ds_{\text{خالص}} = ds_{\text{سیستم}} + ds_{\text{محیط}} \geq \frac{\Delta Q}{T} - \frac{\Delta Q}{T_0}$$

$$\Rightarrow ds_{\text{خالص}} \geq \Delta Q\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

$$T_0 > T \Rightarrow \Delta s_{\text{خالص}} \geq 0$$

اصل افزایش آنتروپی

تغییرات آنتروپی جامدات و مایعات: از آنجا که در طی یک فرآیند برای حالت جامد و مایع تغییرات حجم ناچیز می‌باشد تغییرات آنتروپی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$Tds = du + Pdv \ , \ dv = 0$$

$$Tds = du = c\,dT$$

یا با انتگرال‌گیری:

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

MICRO®

Subject :

Date :

برای تغییرات آنتروپی گاز کامل هم داریم :

$$Tds = du + Pdv$$

$$ds = C_v \, dT , \quad \frac{P}{T} = \frac{R}{v}$$

با انجام مراحل ساده سازی :

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

اما عموماً از جداول ترمودینامیکی استفاده می‌شود

محاسبه کار در فرآیند آدیاباتیک (بی دررو) برای گاز کامل در C_p و C_v ثابت :

$$Q_{1-2} = m(u_2 - u_1) + W_{1-2}$$

$$W_{1-2} = -m(u_2 - u_1) = -mC_v(T_2 - T_1) = \frac{mR}{1-k}(T_2 - T_1) = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-k}$$

(یادآوری : $PV^k =$ ثابت

($PV = mRT$

با استفاده از رابطه کلی گاز :

$$W_{1-2} = \int P dv \Rightarrow PV^k = \text{ثابت} \Rightarrow W_{1-2} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-k}$$

فرآیند پلی تروپیک

بنابراین برای گاز کامل که $PV^n =$ ثابت

$$W_{1-2} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} , \quad n \neq 1$$

برای فرآیند برگشت پذیر دما ثابت (همدمایی) گاز کامل :

$$PV = C \;(\text{ثابت}) \Rightarrow P_1V_1 = P_2V_2$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 P dv = mRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$du = C_v \, dT , \quad dT = 0 \Rightarrow du = 0$$

MICRO

برای انتقال حرارت در چنین شرایطی :

$$\int_1^2 Tds = \int_1^2 Pdv \Rightarrow q_{1-2} = \int_1^2 Tds = P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Subject :   Date :

قانون دوم برای حجم کنترل:

$$\frac{dS_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

(e: خروجی ، i: ورودی)

برای فرآیند SSSF داریم:

$$\frac{dS_{c.v}}{dt} = 0 \Rightarrow \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{c.v} \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

برای تک جریان (یک ورودی و یک خروجی)

$$\dot{m}(s_e - s_i) \geq \sum_{c.v} \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

برای فرآیند آدیاباتیک:

$$s_e \geq s_i$$

(e: خروجی ، i: ورودی)

برای فرآیند USUF:

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{c.v} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i = \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}_{c.v} + L\dot{W}_{c.v}}{T} \right) dt$$

اصل افزایش آنتروپی برای حجم کنترل:

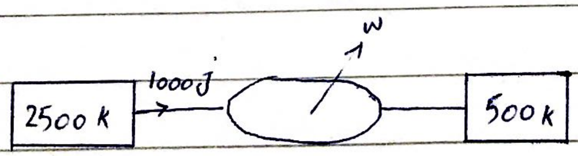
$$\frac{dS_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \left(\frac{\dot{Q}_{c.v}}{T} \right)$$

$$\frac{dS_{\text{محیط}}}{dt} - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \dot{m}_i s_i = \frac{-\dot{Q}_{c.v}}{T_0}$$

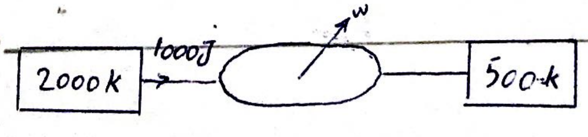
می‌توان نشان داد که:

$$\frac{dS_{\text{net}}}{dt} = \frac{dS_{c.v}}{dt} + \frac{dS_{\text{محیط}}}{dt} \geq 0$$

قابلیت کار دهی: برای موتور حرارتی در بین دو منبع حرارتی حداکثر کاری که قابل استخراج است قابلیت کار دهی خوانده می‌شود که وابسته به اختلاف دما بین منبع دما بالا و دما پایین می‌باشد.

① 

$$w_1 = 1000\left(1 - \frac{500}{2500}\right) = 800\ J$$

② 

$$w_2 = 1000\left(1 - \frac{500}{2000}\right) = 750\ J$$

کار در فرآیند برگشت پذیر SSSF :

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e + w$$

الف) برای فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر: $S_i = S_e$

$$\dot{m}(S_e - S_i) \geq \frac{\dot{Q}_{c.v}}{T}$$

$$Tds = dh - vdp \Rightarrow h_i - h_e = \int_i^e vdp$$

$$w = h_i - h_e + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(Z_i - Z_e) = \int_i^e vdp + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(Z_i - Z_e)$$

برای فرآیند همدمای برگشت پذیر:

$$T(S_e - S_i) = \frac{\dot{Q}_{c.v}}{\dot{m}} = q$$

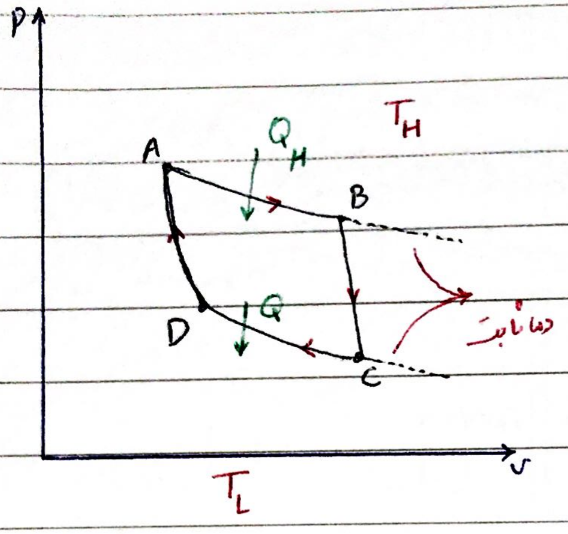
$Tds = dh - vdp$, $T =$ ثابت $\Rightarrow T(S_e - S_i) = h_e - h_i - \int vdp$

در فرآیند SSSF

$$w = -\int vdp + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(Z_i - Z_e) \Rightarrow w = \int vdp + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(Z_i - Z_e)$$

سیکل یا چرخه کارنو: چرخه‌ای است که تمام فرآیندهای آن برگشت پذیر بوده و شامل یک فرآیند انتقال حرارت از سیال عامل به منبع سرد و یک فرآیند انتقال حرارت از منبع گرم به سیال عامل در چرخه می‌باشد این فرآیندها برگشت پذیر بوده و در این چرخه به جز این دو تبادل حرارتی تبادل دیگری وجود ندارد (فرآیندها آدیاباتیک هستند. برای چرخه کارنو بواسطه‌ی بازگشت پذیری و فرآیندهای آدیاباتیک بیشترین مقدار بازده یا راندمان متصور است و می‌توان نشان داد که راندمان فقط به دماهای منبع حرارتی بستگی دارد.

Subject :   Date :



در این چرخه :

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

و بازده آن عبارت است از :

$$\eta = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

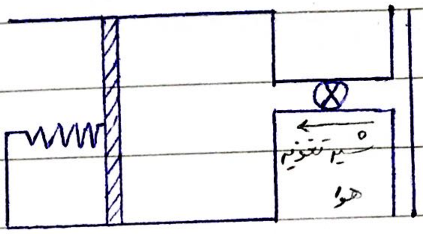
فقط وابسته به دمای منابع است

مثال: فشار هوا در یک مجموعه سیلندر پیستون تحت شرایط بارگذاری شده با فنر مطابق شکل با حجم رابطه‌ی خطی دارد اگر در شرایط اولیه پیستون فشار 150 kPa در 1 لیتر باشد و حالت نهایی 800 kPa در حجم 1,5 لیتر مطلوب است محاسبه کار انجام شده در این فرایند:

$P = A + BV$ ← رابطه‌ی خطی

$P_1 = 150\ kPa,\ V_1 = 1\ lit$

$P_2 = 800\ kPa,\ V_2 = 1.5\ lit$



حالت ۱: $150 = A + 0.001B$

حالت ۲: $800 = A + 0.0015B$

$\Rightarrow A = -1150$ و $B = 1.3 \times 10^{6}$

$\Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV = \int_{0.001}^{0.0015} (1.3\times10^{6}V - 1150)\,dV$:از نظر ریاضی

$\Rightarrow W = 0.273\ kJ = 273\ J$

مثال: مخزن صلبی به حجم 100 lit حاوی نیتروژن در دمای 900 k و فشار 6 MPa است مخزن را تا 100 k سرد می‌کنیم مقدار کار و انتقال حرارت این فرایند چقدر است؟

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک:

$Q_{1-2} - W_{1-2} = \Delta U$

$W_{1-2} = 0$ چرا؟

چون مخزن صلب، تغییر حجم نداشته و کار صفر است.

$\Rightarrow Q_{1-2} = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1)$

از جدول نیتروژن:

① $P_1 = 6\ MPa$, $T_1 = 900\ k$, $V = 0.1\ m^3$ ⟶ $v_1 = 0.045514\ m^3/kg$, $h_1 = 943.59\ kJ/kg$

$m = \frac{V}{v_1} = 2.1971\ kg$

$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 690.506\ kJ/kg$

② $T_2 = 100\ k$, $v_2 = 0.045514\ m^3/kg$

از جدول مشاهده می‌شود که:

600 kPa

T	v	h
96.37	0.04041	84.85
100	?	?
120	0.05510	114.79

$\Rightarrow v = 0.04271\ m^3/kg$, $h = 91.45\ kJ/kg$

MICRO®

ضمیمه

100 k

P	v	h
500	0.05306	94.44
$P_2 = ?$	0.0455514	$h_2 = ?$
600	0.04271	91.45

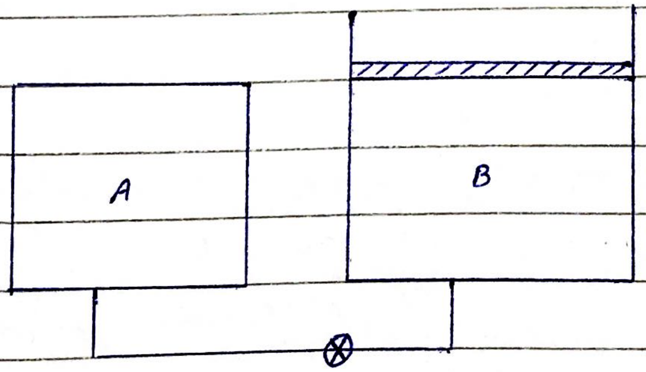
$$\Rightarrow \begin{cases} P_2 = 573\ kPa \\ h_2 = 92.36\ \frac{kJ}{kg} \end{cases}$$

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2 \Rightarrow u_2 = 66.18\ \frac{kJ}{kg} \quad ; \quad Q_{1-2} = m(u_2 - u_1) = 1372\ kJ$$

مثال: سیلندر پیستون B توسط یک لوله و شیر به مخزن A به حجم $1m^3$ وصل شده که هر دو دارای آب می‌باشند. در ابتدا مخزن A در حالت بخار اشباع در فشار 100 kPa است و مخزن B در دمای 400 °C با فشار 300 kPa با حجم $1m^3$ می‌باشد. اگر شیر را باز کنیم تا آب درون A و B به حالت یکنواخت برسد

الف: جرم اولیه درون A و B را بیابید؟

ب: اگر بعد از انجام فرآیند درجه حرارت مخلوط 200 °C باشد مقدار کار و انتقال حرارت را پیدا کنید؟



$$A = \begin{cases} P_1 = 100\ kPa \\ x = 1 \\ V = 1m^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_1 = 2506.06\ \frac{kJ}{kg} \\ v_1 = 1.694\ \frac{m^3}{kg} \end{cases}$$

$$m_A = \frac{V}{v_1} = 0.5903\ kg$$

$$B = \begin{cases} P_1 = 300\ kPa \\ T_1 = 400\ °C \\ V = 1m^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_1 = 2965.53\ \frac{kJ}{kg} \\ v_1 = 1.03151\ \frac{m^3}{kg} \end{cases} \Rightarrow m_B = \frac{V}{v_1} = 0.97\ kg$$

MICRO

Subject : Date :

$m = m_A + m_B =$ ۱,۵۶ kg

$V_1 = V_A + V_B =$ ۲m^3 برای مخازن

اگر مخزن و سیلندر را به عنوان یک سیستم در نظر بگیریم. سیال پس از اتصال تحت فشار محیط خارجی ۳۰۰ kPa قرار دارد. (چرا؟)

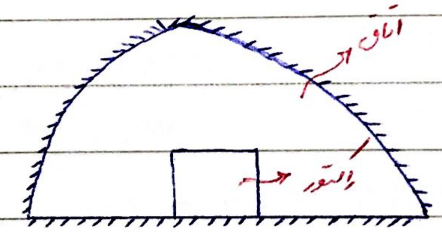
P_2 = ۳۰۰ kPa , T_2 = ۲۰۰ °C ⟹ v_2 = ۰,۷۱۶۳۹ $\frac{m^3}{kg}$, u_2 = ۲۶۵۰,۶۵ $\frac{kJ}{kg}$

$V_2 = m v_2$ = ۱,۱۱۷ m^3

$$\Rightarrow W_{1-2} = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1) = ۲۶۴,۸ \ kJ$$

$$Q_{1-2} = \Delta U + W_{1-2} \Rightarrow Q_{1-2} = (m u_2 - m_A u_{1A} - m_B u_{1B}) + W_{1-2} = -۳۸۵ \ kJ$$

مثال: یک رادیاتور پرشده از آب در فشار و درجه حرارت ۳۶۰°C و ۲۰ MPa در داخل یک اتاق کاملاً عایق قرار دارد حجم رادیاتور ۱m^3 است و اتاقک در ابتدا خلاء می‌باشد اگر در صورت وقوع نقص رادیاتور بترکد آب اتاق را پر می‌کند حداقل حجم اتاق به نحوی که فشار نهایی از ۲۰۰ kPa بیشتر نشود را بدست آورید؟



حالت ① ۲۰ MPa , ۳۶۰ °C — مایع متراکم

v_1 = ۰,۰۰۱۸۲۳ , u_1 = ۱۷۰۲,۷۸ $\frac{kJ}{kg}$

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{۱}{۰,۰۰۱۸۲۳} = ۵۴۸,۵۵ \ kg$$

از قانون اول: $Q_{1-2} = W_{1-2} + m(u_2 - u_1)$

کار برابر صفر است چون مقاومتی در مقابل انبساط وجود ندارد (اتاق خلاء است)

Subject : Date :

$۰ = ۰ + m(u_۲ - u_۱) \Rightarrow \begin{cases} u_۲ = u_۱ = ۱۷۰۲,۷۸ \ kJ/kg \\ P_۲ = ۲۰۰ \ kPa \end{cases}$

در شرایط دو فازی: $\begin{cases} u_f = ۵۰۴,۴۷ \ kJ/kg \\ u_{fg} = ۲۰۲۵,۰۲ \ kJ/kg \end{cases}$

$$x_۲ = \frac{u_۲ - u_{۲f}}{u_{۲fg}} = \frac{۱۷۰۲,۷۸ - ۵۰۴,۴۹}{۲۰۲۵,۰۲} = ۰,۵۹$$

$$v_۲ = v_{۲f} + x_۲ v_{۲fg} = ۰,۵۲۴۵۹۹ \ m^۳/kg$$

$$\Rightarrow V_۲ = m v_۲ = ۵۴۸,۵۵ \times ۰,۵۲۴۵۹۹ = ۲۸۷,۷۵ \ m^۳$$

مثال: یک کامپیوتر در اتاق بسته‌ای به حجم ۲۰۰ m³ انرژی حرارتی معادل ۱۰ kW در فضا منتشر می‌کند اگر داخل اتاق ۵۰ kg چوب و ۲۵ kg فولاد و هوا وجود داشته باشد که همه در دمای ۳۰۰ K باشند با فرض فشار برابر ۱۰۰ kPa در داخل اتاق و یکنواخت گرم شدن تمام این مواد چه مدت طول می‌کشد تا فشار به ۵۰۰ kPa برسد؟

$R = ۰,۲۸۷ \ kJ/kg.K$

$C_v = ۰,۷۱۷ \ kJ/kg$

$PV = mRT$

حالت ①

$۱۰۰ \times ۲۰۰ = m \times ۰,۲۸۷ \times ۳۰۰$

$\Rightarrow m = ۲۳۲,۲۹ \ kg$

با صرف نظر کردن از حجم فولاد و چوب و برابری حجم اتاق با حجم هوا داریم:

$۵۰۰ \times ۲۰۰ = ۲۳۲,۲۹ \times ۰,۲۸۷ \times T_۲$

$\Rightarrow T_۲ = ۱۵۰۰ \ K$

$C_{v\,چوب} = ۱,۲۶ \ kJ/kg$

$C_{v\,استیل} = ۰,۴۶ \ kJ/kg$

$u_۲ - u_۱ = C(T_۲ - T_۱)$

برای چوب:

$Q_۱ = (u_۲ - u_۱) : ۵۰ \times ۱,۲۶ \times (۱۵۰۰ - ۳۰۰)$

$= ۷۵۶۰۰ \ kJ$

برای فولاد (استیل)

$Q_۲ = ۲۵ \times ۰,۴۶ \times (۱۵۰۰ - ۳۰۰)$

$= ۱۳۸۰۰ \ kJ$

برای هوا

$Q_۳ = ۲۳۲,۲۹ \times ۰,۷۱۷ (۱۵۰۰ - ۳۰۰)$

$= ۱۹۹۹۰۰ \ kJ$

$Q_{کل} = Q_۱ + Q_۲ + Q_۳$

$= ۲۸۹,۲۶۰ \ kJ$

$Q = \dot{Q} \times t$

$t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{۲۸۹۲۶۰}{۱۰} = ۲۸۹۲۶$

$\Rightarrow t = \frac{۲۸۹۲۶}{۳۶۰۰} = ۸,۰۳$

MICRO®

Subject: Date:

۱- لوله‌ای بخار یک ساختمان به ارتفاع ۱۵۰۰ m بخار خوف داغ را در ۲۰۰ kPa در سطح زمین دریافت می‌کند و در قسمت بالایی در فشار ۱۲۵ kPa به محیط تحویل می‌دهد اگر اتلاف حرارت در لوله‌ها ۱۱۰ $\frac{kJ}{kg}$ باشد دمای نهایی برای اینکه هیچ آبی درون لوله چگالیده نشود چقدر است؟

راهنمایی: از فرآیند SSSF استفاده کنید.

$T_1 = 170.3\ ^\circ C$ جواب نهایی

۲- موتور اتومبیلی با بازده حرارتی ٪۲۵ کار می‌کند اگر دستگاه تهویه مطبوع ضریب عملکردی برابر $\frac{1}{3}$ ماکزیمم تئوری خود داشته باشد و توسط موتور به حرکت درآید چه مقدار انرژی سوخت اضافی باید مصرف شود تا 1 kJ حرارت در دمای 15°C به محیط 35°C تخلیه شود؟

جواب ۰٫۵۹۴۹ kJ

علی غلامی‌پور